

## بررسی کارایی بلندمدت شبکه‌های آبرسانی در شرایط بحرانی با اعمال عدم قطعیت پارامترها و تغییرات نشت

مهدی دینی\*<sup>۱</sup>، پریسا احدپور<sup>۲</sup>

- ۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، [m.dini@azaruniv.ac.ir](mailto:m.dini@azaruniv.ac.ir)
- ۲- کارشناسی ارشد گروه عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، [pari.ahadpour1996@gmail.com](mailto:pari.ahadpour1996@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

### چکیده:

در این مقاله، کارایی هیدرولیکی بلندمدت شبکه‌های توزیع آب در شرایط بحرانی یا پیک مصرف با اعمال عدم قطعیت پارامترهای مدل و تغییرات نشت بررسی می‌شود که اعمال عدم قطعیت پارامتر نشت و تعریف برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه مبتنی بر تغییرات نشت از نوآوری‌های تحقیق می‌باشد. برای این منظور، ابتدا پارامترهای مدل در شرایط قطعی در سال‌های مورد نظر تخمین زده می‌شود، سپس مقادیر غیرقطعی آنها با استفاده از توزیع‌های آماری و به روش مونت کارلو محاسبه و به مدل شبیه‌ساز شبکه اعمال و سرانجام سطوح کارایی شبکه به صورت احتمالاتی تعیین می‌شود. کارایی هیدرولیکی شبکه با ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه NPRI و کدنویسی در محیط متلب با لینک شبیه‌ساز شبکه EPANET انجام شده است. روش پیشنهادی برای یک شبکه نمونه و یک شبکه واقعی بکار برده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با انجام برنامه‌ریزی بهره‌برداری ۱۵/۳ درصد در سال میانی دوره طرح نسبت به حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری کارایی شبکه افزایش داشته است. به طور کلی با اعمال برنامه‌ریزی بهره‌برداری، عمر شبکه از نظر کارایی هیدرولیکی در شرایط پیک مصرف افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: کارایی هیدرولیکی، عدم قطعیت، نشت، قابلیت اطمینان، پیک مصرف

# Investigation of the long-term performance of water distribution networks in peak consumption conditions by applying the uncertainty of model parameters and leakage variation

Mehdi Dini<sup>al\*</sup>, Parisa Ahadpour<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Associate Professor, Civil Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University

<sup>b</sup> Master's degree in Civil Engineering and Hydraulic Structures Department, Technical and Engineering Faculty, Azarbaijan Shahid Madani University

Received: 05/09/2023

Revised: 26/11/2023

Accepted: 02/12/2023

## Abstract

In this article, the long-term hydraulic performance of water distribution networks in peak consumption conditions is investigated by applying the uncertainty of model parameters and leakage variation. By applying the uncertainty of the leakage parameter and defining network operation planning based on leakage variation are research innovations. For this purpose, first, the model parameters are estimated in deterministic conditions in the desired years. Their non-deterministic values are calculated using statistical distributions and Monte Carlo method and applied to the model. Finally, the network performance levels are determined probabilistically. The Nodal Pressure Reliability Index (NPRI) is used to calculate the hydraulic performance of the network by coding in MATLAB linked with the EPANET simulator. The proposed method has been applied to a sample and real network. The results showed that by implementing the operational planning, the network performance increased by 15.3% in the middle year of the operation period, compared to non-operational planning. In general, by applying operational planning, the network's life increases in peak consumption conditions in terms of hydraulic performance.

Keywords: Hydraulic performance, Uncertainty, leakage, reliability, peak consumption

## مقدمه

تامین تقاضای فزاینده آب در کلان شهرها، محدودیت منابع آبی موجود، هزینه‌های بالا ساخت، تعمیرات و نگهداری از شبکه‌های توزیع آب و موارد مشابه دیگر، لزوم برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری صحیح از شبکه‌ها را مورد توجه قرار می‌دهد. بطوری که با شناخت صحیح رفتار شبکه و برنامه‌ریزی بهره‌برداری صحیح از آن‌ها، امکان سرویس‌دهی مطلوب برای شبکه‌های توزیع آب را ایجاد نمود. از اینرو بررسی کارایی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، نقش مهمی در فرایند بازی می‌کند. تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب اولین قدم در طراحی و بهره‌برداری کارآمد و صحیح از سیستم‌های آبرسانی شهری است، طراحی اولیه شبکه‌های توزیع آب بر اساس مقادیر قطعی صورت می‌گیرد.

<sup>1</sup> Corresponding Author: Email: m.dini@azaruniv.ac.ir

این در حالی است که اکثر متغیرهای مؤثر در بهره برداری از شبکه‌های توزیع آب به طور دقیق و قطعی قابل محاسبه و دستیابی نیستند، تغییر در مقادیر پارامترهای ورودی در طول دوره بهره‌برداری به دلیل عدم قطعیت‌های موجود، رفتار و عملکرد شبکه توزیع آب را در مقایسه با پارامترهای قطعی تغییر می‌دهد، لذا بحث عدم قطعیت به عنوان یک موضوع جدا نشدنی در زمینه بهره‌برداری از این شبکه‌ها باید مد نظر قرار گیرد بنابراین، درک و گنجاندن الگوهای عدم قطعیت در مدل‌سازی برای پیشگیری و آمادگی برای حوادث غیرقابل پیش‌بینی منطقی است. روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت وجود دارد که شامل روش مونت کارلو، شبه مونت کارلو، برش فازی، ممان دوم مرتبه اول و روش ابرمکعب می‌باشد. با توجه به شرایط شبکه و عدم قطعیت در مقدار پارامترهای ورودی، تصمیم‌گیری در زمینه طراحی و بهره برداری از شبکه‌های توزیع آب با چالش‌هایی مواجه می‌شود که برای آگاهی از میزان اطمینان از عملکرد شبکه در شرایط مختلف بهره‌برداری، از شاخصی به نام شاخص قابلیت اطمینان هیدرولیکی یا کیفی استفاده می‌شود. در رابطه با بررسی کارایی شبکه‌های توزیع آب تحقیقات زیادی صورت گرفته است که در ادامه برخی از این موارد مرور خواهد شد.

سیف‌اللهی آغمیونی و همکاران (۱۳۹۰) تاثیر عدم قطعیت توأم نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها در کارایی هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی را بررسی کردند. برای این منظور، میزان انعطاف‌پذیری شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای نسبت به تغییرات احتمالی همزمان دو متغیر مذکور، توسط روش مونت کارلو و محاسبه یک شاخص کارایی قطعی ارزیابی گردید و همچنین محدوده تغییرات مجاز برای پیش‌بینی مقادیر این دو متغیر در شبکه دو حلقه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که در شرایط تغییرات همزمان متغیرها در افق طراحی، به طور میانگین تقریباً تنها در یک سوم مواقع شبکه قادر به تامین کامل نیاز مصرف کنندگان با فشار مورد نیاز بوده و کارایی مطلوب خواهد داشت. قاسمی و حسینی (۱۳۹۱) در یک تحقیق به تحلیل عدم قطعیت در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با منطق فازی پرداخته‌اند. آنان ابتدا تجزیه و تحلیل عدم قطعیت بر روی دبی‌های مختلف طراحی نظیر دبی حداقل، دبی حداکثر و دبی شستشو در سال‌های مختلف در طول اجرای طرح در یک شبکه طراحی شده انجام داده و سپس تأثیر این عدم قطعیت‌ها بر روی متغیرهای وابسته نظیر سرعت و عمق جریان بررسی کردند در پایان به‌عنوان یک رویکرد کاربردی نشان دادند که چگونه نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل عدم قطعیت می‌تواند در ارزیابی عملکرد هیدرولیکی مجاری و مقایسه نسبی آنها در یک مقطع زمانی مشخص و یا متوسط‌گیری شده در طول دوره طرح به کار گرفته شود. (Seifollahi-Aghmiuni et al. (2013a) اثرات عدم قطعیت زبری لوله‌ها بر کارایی شبکه‌های توزیع آب را در طول دوره عملیاتی آن با روش مونت کارلو بررسی کردند و نشان دادند که افزایش عدم قطعیت زبری لوله باعث کاهش عملکرد شبکه در دوره عملیاتی می‌شود و شبکه تنها در ۱۰ سال اول کارایی مطلوبی دارد. (Seifollahi-Aghmiuni et al. (2013b) در پژوهشی آنالیز ریسک شبکه‌های توزیع آب با اعمال همزمان عدم قطعیت مصرف‌گرهی و زبری لوله را انجام دادند و نشان دادند که در طول دوره عملیاتی به طور متوسط کمبود تقاضا و فشار گرهی در شبکه به ترتیب در حدود ۴۵ و ۶۱ درصد است. (Moradi Sabzkouhi and Haghghi (2016) آنالیز عدم قطعیت هیدرولیک شبکه لوله با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه را مطالعه نمودند، یک روش مبتنی بر تئوری مجموعه‌های فازی را برای تجزیه و تحلیل هیدرولیک شبکه تحت عدم قطعیت معرفی

کردند. یک مدل جدید بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MO-PSO) توسعه یافته و یک مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه کوپل کردند. نتایج را با روش‌های قبلی از جمله مدل تک هدفه برنامه ریزی درجه دوم و مدل چند هدفه NSGA-II اصلاح شده مقایسه نمودند. نشان دادند که MO-PSO فازی پیشنهادی از نظر محاسباتی کارآمد و قابل اعتماد است. از نظر سرعت بهینه‌سازی، (MO-PSO) به طور قابل توجهی بهتر از NSGA-II عمل می‌کند. و می‌تواند تمام پاسخ‌های هیدرولیکی شبکه را تنها در یک اجرا انجام دهد. (MO-PSO) فقط بر یافتن مقادیر بی‌نهایت توابع هدف تمرکز می‌کند و زمان را برای تشکیل جبهه پارتو اهداف تلف نمی‌کند. (Hwang et al. (2018) دقت تقریب ممان دوم مرتبه اول برای تحلیل عدم قطعیت سیستم‌های توزیع آب را مورد بررسی قرار دادند برای تعیین کمیت دقت FOSM، نتایج را با نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) مقایسه نمودند. به این نتیجه رسیدند که برآوردهای دقیق عدم قطعیت از FOSM حتی در شرایط اوج تقاضا به دست می‌آید. (Geranmehr et al. (2019) تحلیل عدم قطعیت شبکه‌های توزیع آب با استفاده از مجموعه‌های فازی نوع ۲ و الگوریتم ژنتیک موازی را بررسی نمودند یک رویکرد تحلیل عدم قطعیت فازی برای رسیدگی به عدم قطعیت هد مخزن و تقاضای گره در یک شبیه‌سازی طولانی‌مدت، بر اساس منطق فازی نوع ۲ توسعه دادند. همچنین عدم قطعیت بلند مدت ضریب هیزن ویلیامز (HW) را نیز در نظر گرفته‌اند. از یک الگوریتم ژنتیک موازی برای حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه برای تحلیل عدم قطعیت فازی استفاده کردند به این مهم دست یافتند که سرعت شبکه به شدت تحت تاثیر عدم قطعیت‌ها قرار می‌گیرد و تجمع عدم قطعیت‌های مختلف ممکن است عملکرد شبکه را به طور قابل توجهی تغییر دهد. (Braun et al. (2020) رویکرد طیفی برای تعیین کمیت عدم قطعیت در شبکه‌های توزیع آب را مورد مطالعه قرار دادند، آنها برای اولین بار بسط چند جمله‌ای آشوب را در یک مدل هیدرولیکی اعمال کردند و نتایج آن را با روش‌های کلاسیک مانند روش ممان دوم مرتبه اول و شبیه‌سازی مونت کارلو مقایسه نمودند به این نتیجه رسیدند که دقت بسط چند جمله‌ای آشوب در همان سطح شبیه‌سازی مونت کارلو است. اما به دلیل کارایی محاسباتی، بسط چندجمله‌ای آشوب نسبت به شبیه‌سازی مونت کارلو برتری دارد. دینی و همکاران (۱۴۰۰) در یک پژوهش به پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با اعمال عدم قطعیت پارامترهای کلیدی پرداخته‌اند و نشان دادند که در هر دو حالت ضریب تغییرات ۱۰ و ۲۰ درصد، بالاترین سطوح عملکرد شبکه با احتمال وقوع زیاد در سال‌های اولیه دوره طرح در ساعت‌های حداکثر مصرف و در سال‌های انتهایی دوره طرح در ساعت‌های متوسط مصرف اتفاق می‌افتد. (Dini et al. (2022) قابلیت اطمینان طولانی مدت تصادفی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو را بررسی کردند و با مقایسه نتایج قطعی و تصادفی نشان دادند که روش تصادفی تمایل دارد تا ظرفیت‌های نادیده گرفته شده توسط روش قطعی مانند احتمال شکست قابلیت اطمینان در مکان‌های مختلف رابه طور همزمان نشان دهد و به این نتیجه رسیدند که در واقع، هم در مطالعات نمونه و هم در مطالعات موردی واقعی، نتایج تصادفی تمایل به پیش‌بینی تغییرات قبل از تغییرات قطعی و با شدت بیشتر تغییرات دارند. که این توانایی غیرقابل انکار روش تصادفی در پیش‌بینی شرایط نامطلوب آینده را نشان داد. احدپور و دینی (۱۴۰۱) مقایسه عملکرد شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل در حالت وجود یا عدم وجود نشت را مطالعه نمودند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد نشت در شبکه،

سطح عملکرد شبکه به سمت بدتر شدن پیش می‌رود. احدپور و همکاران (۱۴۰۱) بررسی کارایی شبکه‌های توزیع آب بر اساس عدم قطعیت‌های موجود با برنامه‌های بازسازی و نوسازی متفاوت انجام دادند، دریافتند که اعمال برنامه اصلاح و بازسازی، سبب سوق یافتن کارایی شبکه به سطوح میانی بجای سطوح پایین در سال انتهای دوره طرح و بهبود عملکرد شبکه می‌شود. دینی و همکاران (۱۴۰۲) کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت متغیر فشار در گره‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. ابتدا با معلوم فرض کردن ضرایب هیزن ویلیامز، مقادیر قطعی فشار گرهی شبکه را تعیین نمودند و سپس با تعریف مقادیر فشار، ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه را تنظیم نمودند. به این نتیجه رسیدند که اعمال عدم قطعیت فشار گرهی، منجر به مجموعه جواب‌های متعدد برای ضرایب هیزن-ویلیامز با دامنه تغییرات و انحراف معیار متفاوت می‌شود که با توجه به متوسط خطای مطلق ۴ و ۳/۸ درصدی بین میانگین فشار گرهی در شبکه نمونه و شبکه واقعی در حالت غیرقطعی با حالت قطعی، روش پیشنهادی می‌تواند روش دقیق‌تری برای کالیبراسیون شبکه‌ها باشد، با این وجود چالش‌هایی در مدل‌سازی و زمان اجرای مدل‌های کالیبراسیون وجود دارد. گوهری مقدم و همکاران (۱۴۰۱) طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب تحت عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و استحکام بخشی را مطالعه نمودند. با در نظر گرفتن ارتباط بین تقاضاها و هد فشاری مورد نیاز گره‌ها و با استفاده از روش تاثیر مدل بهینه سازی فازی را به مدل قطعی تبدیل کردند و از طریق الگوریتم ژنتیک، قطرلوله‌های که باید کارگذاری شوند را بدست آوردند. به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهاد شده براساس الگوریتم ژنتیک در مقایسه با الگوریتم ژنتیک بر پایه روش‌های احتمالاتی کاملاً مناسب بوده و شبیه سازی کمتری داشته و جوابی را ایجاد می‌کند که فشارهای مورد نیاز در بدترین وضعیت ایجاد شده تامین شود. Jafari et al. (2022) آنالیز عدم قطعیت دستورالعمل بهینه برای تعمیر و تعویض لوله‌های شبکه توزیع آب با استفاده از برش فازی - رویکرد شبیه سازی هیدرولیک بررسی کردند ترکیبی از مدل شبیه‌سازی (EPANET) و رویکرد برش فازی  $\alpha$  را استفاده نمودند. سناریوی دوم که ترکیبی از حداقل ضریب زبری لوله و حداکثر تقاضا بود، به عنوان سناریوی بحرانی شناختند. به این نتیجه رسیدند که در سناریوی بحرانی، در بالاترین سطح عدم قطعیت، شاخص قابلیت اطمینان شبکه توزیع آب به دلیل عدم فشار مورد نیاز اکثر گره‌ها، بسیار پایین و حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد است. در سطوح پایین تر عدم قطعیت، شاخص قابلیت اطمینان به بالای ۷۵ درصد می‌رسد که نسبتاً قابل قبول است. گوهری مقدم و همکاران (۱۴۰۲) به مطالعه آنالیز فازی شبکه‌های توزیع آب تحت شرایط کمبود فشار پرداختند. در این تحقیق با توسعه یک مدل مبتنی بر آنالیز فازی، حل معادلات حاکم بر شبکه به صورت مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است که شبیه‌سازی براساس فراخوانی نرم‌افزار شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET در محیط متلب و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. به این نتیجه رسیدند که در شرایط کمبود فشار اختلاف نتایج حاصل از تحلیل مبتنی بر فشار و تحلیل مبتنی بر تقاضا، قابل توجه است.

در مجموع تحقیقات کمی در رابطه با بررسی کارایی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب با اعمال عدم قطعیت پارامترهای مدل وجود دارد. از طرفی در تحقیقات موجود به موضوع تغییرات نشت و برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه مبتنی بر تغییرات نشت پرداخته نشده است. در این تحقیق کارایی هیدرولیکی بلندمدت شبکه‌های توزیع آب در شرایط بحرانی یا پیک مصرف با اعمال عدم قطعیت پارامترهای مدل بررسی شده

است، بطوری که بررسی تغییرات پارامتر نشت و عدم قطعیت آن در قالب برنامه‌ریزی بهره‌برداری یا عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری برای اولین بار در این تحقیق مطرح شده است که به عنوان نوآوری تحقیق محسوب می‌شود. مدل‌سازی در محیط متلب و با لینک با شبیه‌ساز هیدرولیکی شبکه ایپانت انجام شده است و روش پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه دو حلقه‌ای و یک شبکه توزیع آب واقعی بکار برده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدل هیدرولیکی

در این مقاله، از نرم افزار EPANET برای تحلیل هیدرولیکی شبکه استفاده شده است. برای بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل بر عملکرد هیدرولیکی شبکه، عدم قطعیت همزمان چهار پارامتر شامل قطر و ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها، مصارف و ضرایب نشت گره‌ها به عنوان پارامترهای دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شد. ضریب هیزن ویلیامز و قطر لوله‌ها بر اساس معادله هیزن ویلیامز به صورت رابطه ۱ بیان می‌گردد.

$$h_f = \frac{1.68LQ^n}{C_{HW}^{1.852}D^{4.87}} \quad (1)$$

که در آن  $h_f$  افت هد در یک لوله (متر)،  $L$  طول یک لوله (متر)،  $Q$  دبی جریان در یک لوله (مترمکعب بر ثانیه)،  $n$  توان دبی است که برای رابطه هیزن ویلیامز برابر  $1/852$  می‌باشد،  $D$  قطر لوله (متر)،  $C_{HW}$  ضریب هیزن ویلیامز لوله می‌باشد (تائبی و چمنی، ۱۳۹۱). مقدار مصارف در گره‌ها بر اساس رابطه پیوستگی جریان در گره‌ها و از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$\sum_{i=1}^{NP_j} (Q_i) + q_j = 0 \quad (2)$$

که  $Q_i$  مصرف جریان در لوله  $i$  متصل به گره  $j$  ام (مترمکعب بر ثانیه)،  $NP_j$  تعداد لوله‌های متصل به گره  $j$  ام و  $q_j$  مقدار مصرف در گره  $j$  ام (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد.

### ۲-۲- تخمین پارامترها در دوره طرح

در مدل‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه‌های توزیع آب نیاز است برخی پارامترهای مدل تعیین شوند. برای این منظور، برخی پارامترهای مدل مانند طول لوله‌ها یا ارتفاع گره‌های شبکه از طریق نقشه‌برداری تعیین می‌شوند. برخی پارامترهای دیگر مانند قطر و جنس لوله‌ها در مرحله طراحی و بر اساس دبی طرح و ضوابط طراحی و بهره‌برداری تعیین می‌شوند. برخی پارامترهای دیگر مانند ضرایب زبری لوله‌ها، مصارف در گره‌ها، ضرایب الگوی مصرف ساعتی، ضرایب نشت از طریق داده‌های میدانی موجود یا مدل‌های کالیبراسیون و یا تخمین از روی روابط موجود بدست می‌آیند. در این تحقیق از ترکیبی از حالت‌های فوق برای تخمین ضرایب و پارامترهای شبکه‌های مورد مطالعه استفاده شده

است. بطور مثال ضرایب زبری و ضرایب الگوی مصرف و ضرایب نشت مدل شبکه توزیع آب اهر در سال پایه از طریق کالیبراسیون بدست آمده است (Dini and Tabesh., 2014; Dini and Asadi., 2019) و یا مصارف در گره‌های شبکه در سال پایه از طریق داده‌های میدانی موجود محاسبه شده است. در ارتباط با تغییرات این ضرایب در طول دوره بهره‌برداری از روابط توسعه یافته در تحقیقات قبلی بهره گرفته شده است. برای مدل‌سازی تغییرات ضریب هیزن‌ویلیامز در طول سال‌های دوره طرح از رابطه ۳ استفاده شده است که در تحقیقات قبلی به صورت گسترده بکار برده شده است (Sharp and Walski., 1998; Seifollahi-Aghmiuni et al., 2013b; Dini et al., 2022)

$$C_{HW}(i, t) = 18 - 37.2 \log \left( \frac{(e_{0i} + a_i(t + g_i))}{D_i} \right) \quad (3)$$

که  $C_{HW}(i, t)$  ضریب هیزن‌ویلیامز لوله  $i$  در سال  $t$ ،  $e_{0i}$  زبری اولیه در لوله  $i$  در زمان نصب لوله وقتی که تازه بود،  $a_i$  درجه رشد زبری در لوله  $i$ ،  $g_i$  سن لوله  $i$  در سال پایه،  $t$  زمان سپری شده سالانه،  $D_i$  قطر لوله  $i$  (متر) می‌باشد. همچنین برای تخمین تغییرات تقاضا در شبکه توزیع آب در طول سال‌های دوره طرح از رابطه رشد هندسی به صورت رابطه ۴ استفاده شده است (تائبی و چمنی، ۱۳۹۱).

$$q(j, t) = q(j, 0) \text{Exp}(k_g t) \quad (4)$$

که در آن،  $q(j, t)$  تقاضای گرهی در گره  $j$  در سال  $t$ ،  $q(j, 0)$  تقاضای گرهی در گره  $j$  در سال صفر (لیتر بر ثانیه)،  $k_g$  میزان رشد هندسی تقاضا در هر سال (یک بر سال) می‌باشد که در این تحقیق متناسب با نرخ رشد جمعیت در شهر اهر ۲ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین برای محاسبه عدم قطعیت مربوط به گرفتگی قطر لوله‌ها که به علت رسوب‌گذاری، تغییرات سرعت جریان در لوله، کیفیت آب و سایر عوامل مرتبط در طول دوره بهره‌برداری اتفاق می‌افتد، ریسک گرفتگی در دوره طرح  $T$  سال با استفاده از معادله ۵ محاسبه می‌شود (Salas and Obeysekera, 2014).

$$R(t) = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t \quad (5)$$

$R(t)$  خطر گرفتگی لوله در طول دوره طرح  $T$  سال و عمر طرح  $t$  سال است. احتمال اینکه واقعه مذکور حداقل یکبار در عمر پروژه رخ دهد، احتمال خطر گرفتگی یا ریسک گرفتگی نامیده می‌شود. بطور کلی قسمت باز قطر داخلی لوله از معادله ۶ بدست می‌آید.

$$D(i, t) = D(i, 0) - r_D D(i, 0) R(t) \quad (6)$$

که در آن  $D(i, t)$  قطر لوله  $i$  در سال  $t$ ،  $D(i, 0)$  قطر لوله  $i$  در سال صفر (متر)،  $r_D$  نسبتی از قطر داخلی لوله که در طول دوره بهره‌برداری ممکن است مسدود شود.

همچنین برای محاسبه نشت شبکه توزیع آب از رابطه ۷ و ۸ استفاده شده است (Araujo et al, 2006)

$$q_j = k_f p_j^\beta \quad (7)$$

$$k_f = c \times \sum_{j=1}^M 0.5 \times L_{ij} \quad (8)$$

که در آن  $q_j$  میزان نشت از گره  $z$ ،  $p_j$  فشار سرویس گره  $z$  و  $k_f$  ضریب ثابت نشت برای گره مورد نظر است که در سال پایه مبتنی بر مدل کالیبراسیون برای نشت‌های مختلف تنظیم می‌شود به طوری که اگر نشت از شبکه ۲۰ درصد باشد، مقادیر  $k_f$  در گره‌ها به شکلی تنظیم می‌شود که مقدار نشت از شبکه در مجموع برابر ۲۰ درصد شود،  $L_{ij}$  مجموع طول تمام لوله‌های متصل به گره  $z$  و  $c$  ضریب تخلیه از روزنه‌های موجود در اتصالات و لوله‌ها می‌باشد و به شکل و قطر آن بستگی دارد و  $\beta$  به عنوان ضریب توان رابطه نشت مطابق مطالعات قبلی برابر ۱/۱۸ می‌باشد (Araujo et al, 2006; Dini and Asadi., 2019). ضرایب نشت در سال‌های مختلف دوره طرح، متناسب با شرایط برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه، وضعیت موجود و عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری با درصد تغییرات ۲/۵-، صفر و ۲/۵+ درصد برای هر سال در طول دوره بهره‌برداری تغییر می‌کند.

### ۳-۲- کارایی هیدرولیکی شبکه

برای ارزیابی کارایی هیدرولیکی شبکه از شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه به صورت روابط ۹ و ۱۰ استفاده شده است. این روابط برای اولین بار توسط (دینی و تابش، ۱۳۹۷) ارائه شده است که در آن قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه در همسایگی فشار ۳۱ متر بیشترین مقدار و در فشارهای کمتر یا بیشتر از آن قابلیت اطمینان شبکه کاهش می‌یابد. بطوریکه تا فشار گرهی برابر ۱۰ متر، شبکه در حالت عدم سرویس‌دهی، با افزایش فشار تا ۳۱ متر شبکه به حالت سرویس‌دهی مطلوب می‌رسد. همچنین برای فشارهای بیشتر از ۳۱ متر تعداد حوادث، تلفات آب و نشت در شبکه افزایش می‌یابد. مجدداً قابلیت سرویس‌دهی شبکه کاهش پیدا می‌کند و برای فشارهای بالاتر از فشار حداکثر مجاز (۶۰ متر)، شبکه در حالت سرویس‌دهی غیر قابل قبول می‌باشد (دینی و تابش، ۱۳۹۷).

$$NPRI(j, t) = \begin{cases} 0 & P_{jt} < 10 \\ \frac{1}{32} (P_{jt} - 10) & 10 < P_{jt} < 26 \\ \frac{1}{10} (P_{jt} - 26) + 0.5 & 26 < P_{jt} < 31 \\ 1 & P_{jt} = 31 \\ -\frac{1}{38} (P_{jt} - 31) + 1 & 31 < P_{jt} < 50 \\ -\frac{1}{40} (P_{jt} - 50) + 0.5 & 50 < P_{jt} < 60 \\ 0.25 & 60 < P_{jt} \end{cases} \quad (9)$$



$$NPRI = \frac{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req} (NPRI(j, t))}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (10)$$

که در آن  $NPRI(j, t)$ : مقدار شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی در گره زام در زمان  $t$  و  $P_{jt}$ : فشار گرهی در گره زام در زمان  $t$  (متر) و  $NPRI$ : شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه،  $NN$ : تعداد گره‌های شبکه،  $Q_{j,t}^{req}$ : تقاضای مورد نیاز گره زام در زمان  $t$  (لیتر بر ثانیه) و  $NPRI$ : شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه می‌باشد (دینی و تابش، ۱۳۹۷).

#### ۲-۴- عدم قطعیت پارامترها

برای ایجاد عدم قطعیت در پارامترهای مدل از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و برای تولید تصادفی پارامترها از توزیع نرمال به صورت رابطه ۱۱ استفاده شده است (Seifollahi-Aghmiuni et al, 2013a).

$$F_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$F_x(x)$  تابع چگالی احتمال متغیر  $x$ ،  $\mu_x$  میانگین متغیر  $x$  و  $\sigma_x$  انحراف معیار استاندارد متغیر  $x$  می‌باشد. تعداد نمونه‌های تولید شده به روش مونت کارلو برای هر پارامتر برابر ۱۰۰۰۰ بدست آمده است که مبتنی بر روش سعی و خطا و از تحقیقات قبلی گرفته شده است. در مجموع از منحنی تغییرات خطا در مقابل تعداد تکرارها، در کمترین تعداد تکراری که خطا کمترین و ثابت است، تعداد تکرار مناسب تعیین شده است (Dini et al., 2022).

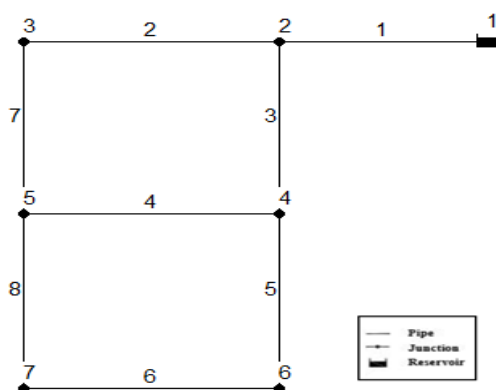
#### ۲-۵- ساختار روش



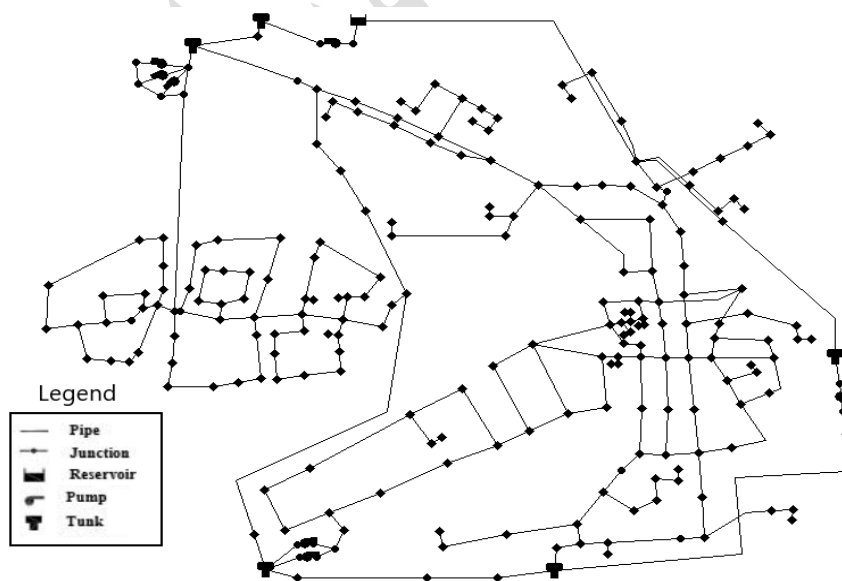
شکل ۱- روندنمای روش تحقیق

### ۳- مطالعه موردی

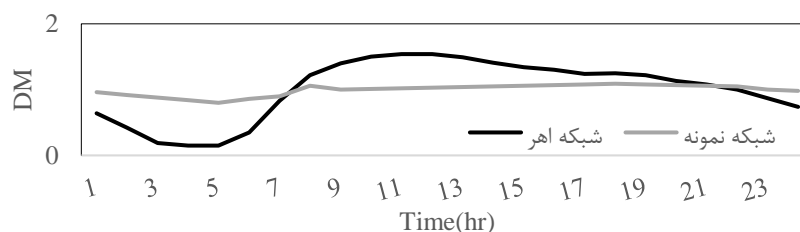
در بخش مطالعه موردی، به منظور تشریح روش پیشنهادی از شبکه دو حلقه‌ای و شبکه توزیع آب اهر استفاده شده است که شبکه دو حلقه‌ای در مقالات مختلف به عنوان یک مثال تحقیقاتی بررسی شده است (Alperovits and Shamir, 1977). این شبکه دارای ۸ لوله، ۶ گره و یک مخزن می‌باشد، همچنین شبکه توزیع آب شهر اهر (Dini et al., 2022) دارای ۲۵۴ لوله، ۲۲۳ گره، یک مخزن و ۵ تانک می‌باشد. طرح کلی شبکه‌های مذکور در شکل‌های ۲ و ۳ همچنین ضرایب الگوی مصرف گره‌ها در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۲- شبکه نمونه دو حلقه‌ای



شکل ۳- ساختار ساده شده شبکه توزیع آب اهر



شکل ۴- تغییرات ساعتی الگوی مصرف در شبکه‌های مورد مطالعه

#### ۴- بحث و نتایج

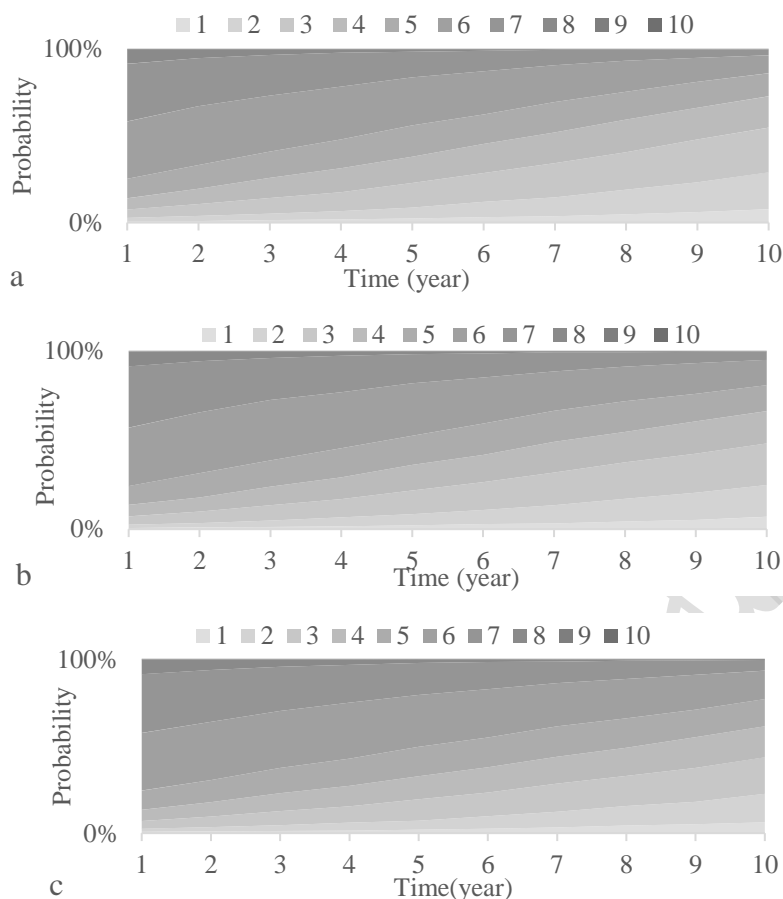
بررسی کارایی هیدرولیکی شبکه نمونه و شبکه توزیع آب شهر اهر، با اعمال عدم قطعیت همزمان چهار پارامتر ضریب هیزن ویلیامز و قطر لوله‌ها، مصارف در گره‌ها و ضرایب نشت با تغییرات  $+2/5$ ، صفر و  $-2/5$  درصد برای حالت‌های عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود و برنامه‌ریزی بهره‌برداری در حالت نشت ۲۰ درصد در ساعت پیک مصرف انجام شده است، مقادیر ارزیابی شده شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه محاسبه و در قالب سطوح سرویس شبکه در ۱۰ دسته مجزا بر اساس شاخص قابلیت اطمینان با بازه‌های نامساوی دسته‌بندی شدند. در جدول ۱ سطوح سرویس شبکه از ۱ تا ۱۰ و بازه تغییرات قابلیت اطمینان شبکه برای آنها نشان داده شده است.

جدول ۱- سطوح سرویس و بازه تغییرات قابلیت اطمینان شبکه‌ها

۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	سطح سرویس
۰/۹-۱	۰/۸-۰/۹	۰/۷-۰/۸	۰/۶-۰/۷	۰/۵-۰/۶	۰/۴-۰/۵	۰/۳-۰/۴	۰/۲-۰/۳	۰/۱-۰/۲	۰-۰/۱	بازه تغییرات NPRI شبکه دو حلقه
۰/۷۵-۱	۰/۷-۰/۷۵	۰/۶۵-۰/۷	۰/۶-۰/۶۵	۰/۵۵-۰/۶	۰/۵-۰/۵۵	۰/۴۵-۰/۵	۰/۴-۰/۴۵	۰/۳۵-۰/۴	۰-۰/۳۵	بازه تغییرات NPRI شبکه توزیع آب اهر

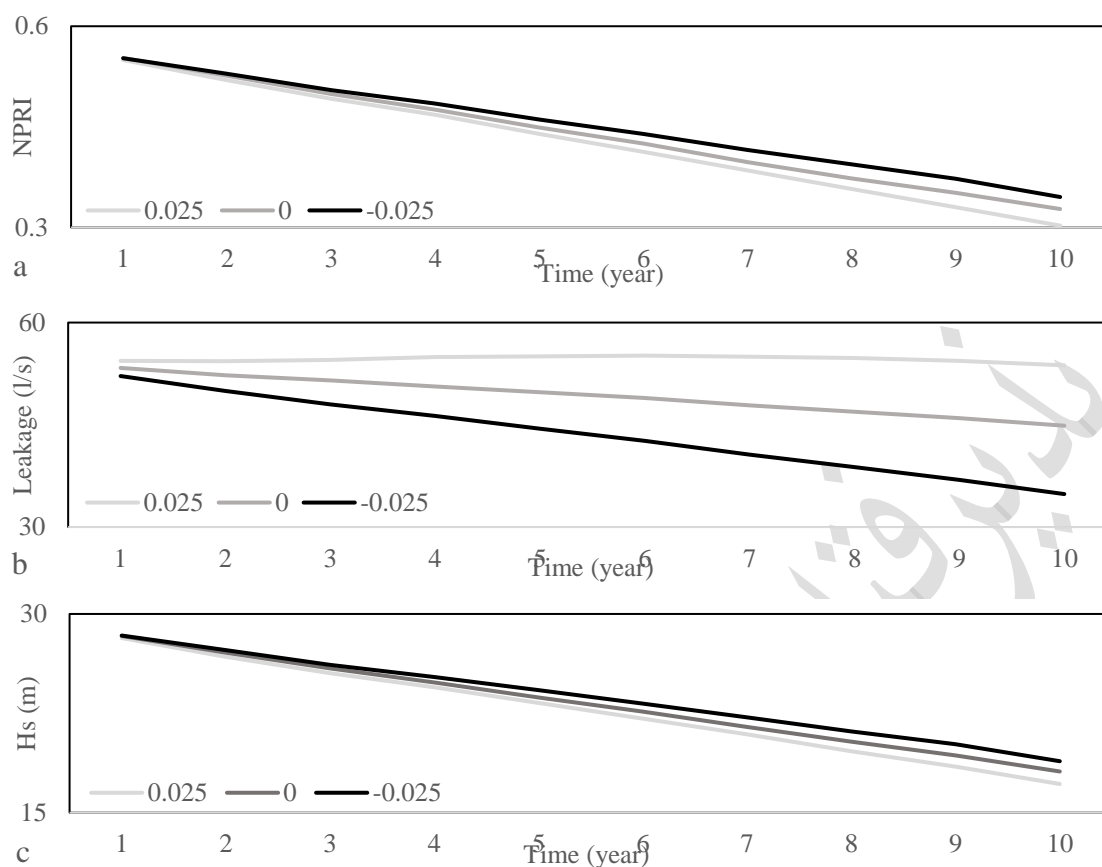
مطابق الگوی مصرف، ساعت ۵، ساعت حداقل مصرف، ساعت ۹، ساعت متوسط مصرف و ساعت ۱۸، ساعت حداکثر مصرف در شبکه دو حلقه‌ای و ساعت ۴، ساعت حداقل مصرف، ساعت ۲۲، ساعت متوسط مصرف و ساعت ۱۲، ساعت حداکثر مصرف، در شبکه اهر می‌باشد. با توجه به جدول ۳ سطوح سرویس ۶ و بالاتر در شبکه نمونه سطح سرویس قابل قبول و سطوح سرویس ۱ تا ۵ در شبکه مذکور سطح سرویس غیر قابل قبول است. همچنین سطوح سرویس ۵ و بالاتر در شبکه اهر، سطح سرویس قابل قبول و سطوح سرویس ۱ تا ۴، سطح سرویس غیر قابل قبول می‌باشند.

#### ۴-۱- شبکه نمونه دو حلقه‌ای



شکل ۵- پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه نمونه در طول دوره بهره‌برداری  
 (a: عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، b: وضعیت موجود، c: برنامه‌ریزی بهره‌برداری)

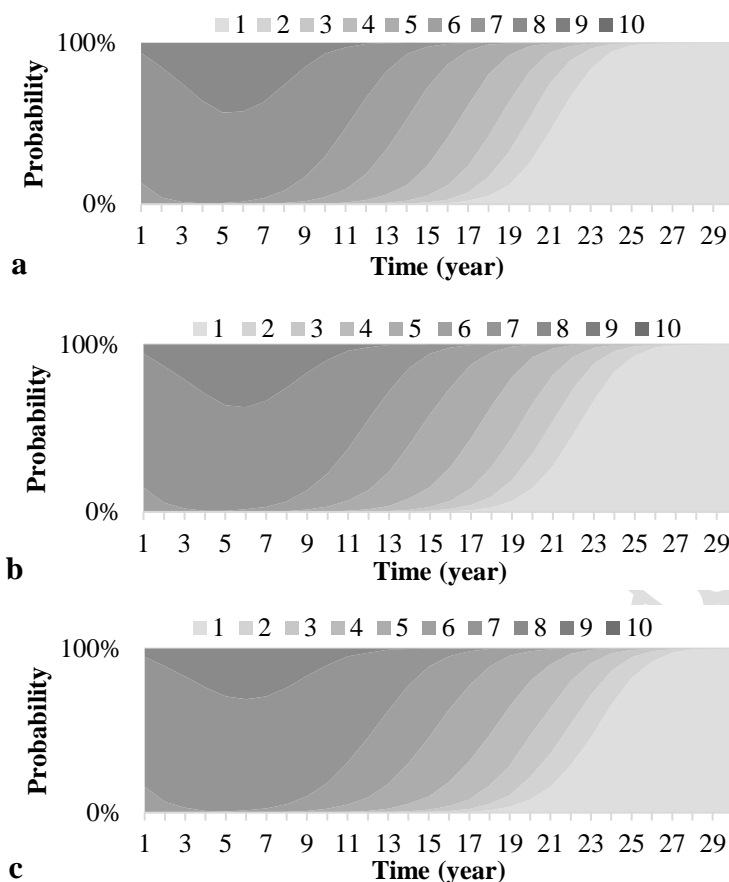
در شکل‌های فوق، پهنه‌های با رنگ تیره عملکرد بهتر نسبت به پهنه‌های با رنگ روشن دارند. همانطور که از شکل ۵ مشخص است در سال اول بیشترین عملکرد قابل قبول به ترتیب در حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری با احتمال  $۳۳/۲۳$ ،  $۳۴/۳۹$  و  $۳۳/۷۳$  درصد متعلق به سطح سرویس ۷ با قابلیت اطمینان  $۰/۶$  تا  $۰/۷$  و با احتمال  $۳۳/۱۲$ ،  $۳۲/۸۵$  و  $۳۳/۱۳$  درصد در سطح سرویس ۶ با قابلیت اطمینان  $۰/۵$  تا  $۰/۶$  می‌باشد. همچنین در سال میانی بالاترین احتمالات قابل قبول با مقادیر  $۲۷/۷۶$ ،  $۲۹/۳۷$  و  $۲۹/۶۷$  درصد متعلق به سطح سرویس ۶ و با احتمال  $۱۴/۶۹$ ،  $۱۶/۳۷$  و  $۱۸/۳۹$  درصد متعلق به سطح سرویس ۷ می‌باشد. در سال انتهایی دوره طرح در حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری بیشترین عملکرد غیرقابل قبول با احتمال  $۲۳/۳۹$  و  $۲۱/۰۳$  درصد متعلق به سطح سرویس ۳ و کل عملکرد غیرقابل قبول به ترتیب با احتمالات  $۸۶/۰۹$ ،  $۸۰/۹۴$  و  $۷۷/۱۱$  درصد می‌باشند. همچنین بیشترین عملکرد قابل قبول هم با احتمال  $۱۰/۳۸$ ،  $۱۴/۲۲$  و  $۱۶/۳۱$  درصد در سطح سرویس ۶ قرار دارند. حال اگر مینا ۵۰ درصد عملکرد شبکه باشد، در حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه به ترتیب در سال‌های ۵، ۶ و ۵۰ درصد کارایی خود را از دست می‌دهد. که این خود نشان دهنده آن است که برنامه‌ریزی بهره‌برداری سبب می‌شود شبکه دیرتر کارایی خود را از دست بدهد.



شکل ۶- روند تغییرات قابلیت اطمینان، نشت و فشار شبکه نمونه در طول دوره بهره‌برداری

(a: قابلیت اطمینان، b: نشت، c: فشار)

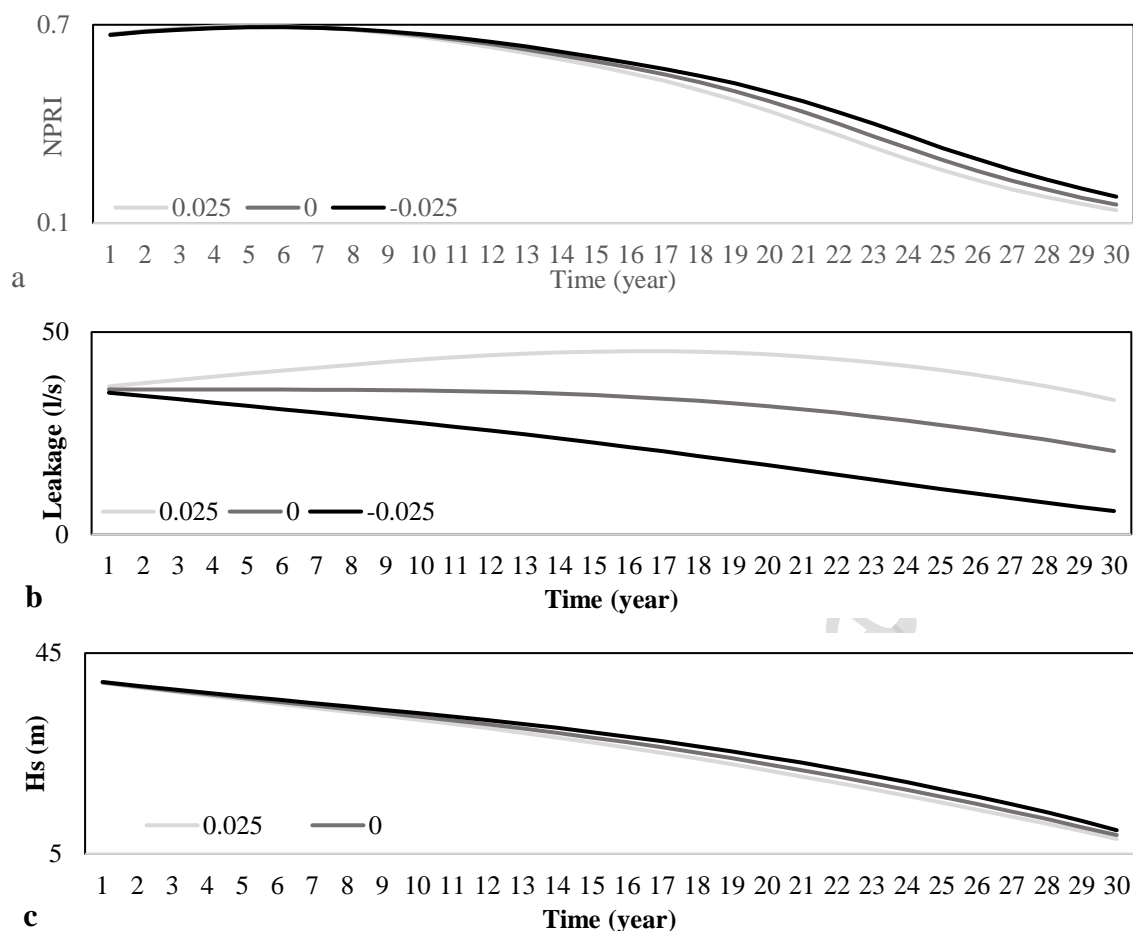
همانطوری که از شکل ۶a مشخص است. قابلیت اطمینان به طور کلی حالت کاهشی دارد. از طرفی شدت این کاهش در حالت برنامه‌ریزی بهره‌برداری کمتر از وضعیت موجود و آن هم کمتر از حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری می‌باشد. اگر ۵۰ درصد کارایی شبکه مبنا باشد، برای حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری به ترتیب در سال‌های ۳، ۳ و ۴ شبکه کارایی خود را از دست می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۶b، مقدار نشت در حالت‌های مختلف از سال اول تا سال آخر برای سناریو عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری از ۵۴/۳۶ لیتر در ثانیه به ۵۳/۷۲ لیتر در ثانیه و برای سناریو برنامه‌ریزی بهره‌برداری از ۵۲/۱۵ لیتر در ثانیه به ۳۴/۸۳ لیتر در ثانیه، همچنین برای وضعیت موجود از ۵۳/۳۴ لیتر در ثانیه به ۴۴/۸۶ لیتر در ثانیه کاهش پیدا کرده است. می‌توان بیان کرد در حالت برنامه‌ریزی نسبت به حالت عدم برنامه‌ریزی نشت در طی زمان بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۶c، فشار در هر سه سناریو از سال اول تا سال آخر نزولی می‌باشد. بطوریکه از ۲۸/۱۸، ۲۸/۳۴ و ۲۸/۳۷ به ترتیب برای سناریوهای عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری به ۱۷/۱۶، ۱۸/۱۱ و ۱۸/۸۸ کاهش یافته است. اگر متوسط فشار ۲۶ متر مبنا باشد، برای حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری به ترتیب از سال ۳، ۳ و ۴ شبکه کارایی خود را از دست می‌دهد. که مشابه نتایجی است که در نمودار مقایسه‌ای قابلیت اطمینان بدست آمده است.



شکل ۷- پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب اهر در طول دوره بهره‌برداری

a: عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، b: وضعیت موجود، c: برنامه‌ریزی بهره‌برداری)

بررسی کارایی بلندمدت شبکه توزیع آب اهر نشان می‌دهد که مطابق شکل ۷ در هر سه سناریو در سال اول دوره طرح، شبکه کاملاً عملکرد قابل قبول و در سال آخر دوره طرح کاملاً عملکرد غیر قابل قبول دارند که در سال اول بیشترین عملکرد قابل قبول به ترتیب در حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری با احتمال ۸۰/۵۵، ۷۹/۰۹ و ۷۹/۰۹ درصد متعلق به سطح سرویس ۷، با قابلیت اطمینان ۰/۶ تا ۰/۶۵ و با احتمال ۱۳/۲۶، ۱۴/۶۷ و ۱۵/۸۷ درصد متعلق به سطح سرویس ۶ با قابلیت اطمینان ۰/۵۵ تا ۰/۶ می‌باشد. همچنین در سال میانی بالاترین احتمالات با مقادیر ۴۸/۶۶، ۴۳/۴۱ و ۴۳/۳۱ درصد متعلق به سطوح سرویس ۵ و ۶ می‌باشد. در سال انتهای دوره طرح در هر دو حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری و وضعیت موجود ۱۰۰ درصد عملکرد غیر قابل قبول متعلق به سطح سرویس ۱ با قابلیت اطمینان ۰ تا ۰/۳۵ و در حالت برنامه‌ریزی بهره‌برداری بیشترین عملکرد غیرقابل با احتمال ۹۹/۹۷ درصد متعلق به سطح سرویس ۱ می‌باشد. اگر مبنا ۵۰ درصد عملکرد شبکه باشد در حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود و برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه به ترتیب در سال ۱۷، ۱۸ و ۱۹ ام ۵۰ درصد کارایی خود را از دست می‌دهد. این خود نشان دهنده آن است که برنامه‌ریزی بهره‌برداری سبب می‌شود شبکه دیرتر کارایی خود را از دست بدهد.



شکل ۸- روند تغییرات قابلیت اطمینان، نشت و فشار شبکه توزیع آب اهر در طول دوره بهره‌برداری

(a: قابلیت اطمینان، b: نشت، c: فشار)

همچنین مطابق شکل ۸a، قابلیت اطمینان برای دو سناریوی عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری و وضعیت موجود تا سال ۵ افزایش یافته، از سال ۵ به بعد تا سال آخر دوره طرح کاهش به خود گرفته است. این درحالی است که در سناریوی برنامه‌ریزی بهره‌برداری تا سال ۶ دوره طرح قابلیت اطمینان افزایش داشته و بعد از آن تا سال آخر دوره طرح روند نزولی به خود گرفته است. از طرفی شدت این کاهش در حالت برنامه‌ریزی بهره‌برداری کمتر از وضعیت موجود و آن هم کمتر از حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری می‌باشد. در هر حالت قابلیت اطمینان شبکه کاهش پیدا می‌کند سرعت این کاهش زمانی که عملکرد شبکه خوب باشد، نسبتاً کندتر می‌باشد و از سالی که شبکه ۵۰ درصد عملکرد خود را از دست می‌دهد شدت بیشتری می‌یابد و تا انتها با شیب تند ادامه پیدا می‌کند. اگر ۵۰ درصد کارایی هیدرولیکی شبکه مبنای عملکرد قابل قبول یا غیرقابل قبول باشد. برای حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری به ترتیب در سال‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ شبکه کارایی خود را از دست می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۸b، مقدار نشت برای سناریو عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری از ۳۶/۶۲ لیتر در ثانیه در سال اول به ۴۵/۲۶ لیتر در ثانیه تا سال ۱۶ دوره طرح افزایش یافته است، سپس تا سال آخر دوره طرح کاهش به خود گرفته است که در سال ۳۰ به ۳۳/۱۹ لیتر در ثانیه کاهش می‌یابد. این درحالی است که در سناریو برنامه‌ریزی بهره‌برداری در سال اول، از ۳۵/۰۱ لیتر در ثانیه به ۵/۷۶ لیتر در ثانیه در سال آخر کاهش پیدا کرده است. در وضعیت موجود ۴ سال اول حالت نوسانی داشته سپس از سال ۵ تا سال ۳۰ دوره طرح به ۲۰/۶ لیتر در ثانیه کاهش می‌یابد. به طور کلی می‌توان استدلال کرد که در حالت برنامه‌ریزی نسبت به حالت عدم برنامه‌ریزی عملکرد نشت در طول دوره بهره‌برداری بیشتر تغییر یافته و بیشتر نزول پیدا می‌کند. در مجموع، طی سال‌هایی که

شبکه عملکرد خود را از دست می‌دهد، به دلیل افت بیش از حد فشار، در برخی گره‌های شبکه تامین تقاضا و به دنبال آن نشت اتفاق نمی‌افتد که این عامل علت، افت زیاد نشت در سال‌های پایانی دوره طرح می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج شکل ۸C، فشار در هر سه سناریو حالت نزولی داشته است بطوریکه برای سناریوهای عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری به ترتیب ۳۹/۱۷، ۳۹/۰۷، ۳۹/۲۴ و در سال اول به ۷/۹۸، ۸/۷۶ و ۹/۷۱ در سال آخر دوره طرح کاهش یافته است که در بین حالت‌های فوق، شدت نزول حالت برنامه‌ریزی بهره‌برداری کمتر می‌باشد. اگر متوسط فشار ۲۶ متر مبنای تامین کامل تقاضا در گره‌ها باشد، برای حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری به ترتیب از سال ۱۷، ۱۸ و ۱۹ شبکه کارایی خود را از دست می‌دهد و بیانگر این است که در حالت برنامه‌ریزی بهره‌برداری، شبکه توزیع آب اهر دیرتر از سایر حالت‌ها کارایی هیدرولیکی خود را از دست داده است.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، کارایی هیدرولیکی بلندمدت شبکه‌های توزیع آب در شرایط بحرانی یا پیک مصرف با اعمال عدم قطعیت پارامترهای مدل و تغییرات نشت بررسی شده است که در آن برای محاسبه عدم قطعیت ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها، مصارف و ضرایب نشت گره‌ها از توزیع نرمال و قطر لوله‌ها از تابع ریسک گرفتگی لوله‌ها در دوره طرح T سال و روش مونت کارلو استفاده شده است. در مجموع منابع عدم قطعیت در یک مدل شامل عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌ها، عدم قطعیت در پارامترها و عدم قطعیت در مدل‌سازی است که در این تحقیق تنها به عدم قطعیت موجود در تعدادی از پارامترهای مدل پرداخته شده است و به سایر جنبه‌های منابع عدم قطعیت در مدل‌ها توجه نشده است. از طرفی مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترهای مدل با روش مونت کارلو انجام شده است و سایر روش‌ها در نظر گرفته نشده است که می‌توانند، در مطالعات مشابه دیگر مورد توجه قرار گیرد. مدل‌سازی در محیط متلب و با لینک نرم‌افزار EPANET به عنوان شبیه‌ساز شبکه انجام گردیده است که مدت زمان اجرای مدل از محدودیت‌های تحقیق می‌باشد. همچنین برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه از شاخص NPRI استفاده شده است که در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی سالانه در طول دوره طرح شبکه ارائه شده است و حاوی اطلاعات مربوط به سطوح عملکرد شبکه به همراه احتمال وقوع آنها در سال‌های مختلف بهره‌برداری می‌باشد. بررسی کارایی شبکه‌ها با اعمال عدم قطعیت ضرایب نشت و تعریف حالت‌های عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری، وضعیت موجود و برنامه‌ریزی بهره‌برداری مبتنی بر تغییرات ضرایب نشت برای اولین بار در این مقاله بررسی شده است و نتایج نشان می‌دهد که با انجام برنامه‌ریزی بهره‌برداری ۱۵/۳ درصد در سال میانی دوره طرح نسبت به حالت عدم برنامه‌ریزی بهره‌برداری کارایی شبکه افزایش داشته است. که نشان می‌دهد با اعمال برنامه‌ریزی بهره‌برداری، شبکه در طول دوره طرح، دیرتر کارایی هیدرولیکی خود را از دست می‌دهد. در مجموع، توسعه روش‌های که بتواند عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب را در نظر بگیرد، گامی مهم در بهبود شرایط بهره‌برداری شبکه‌ها در حوزه مدیریت آب شهری محسوب می‌شود.

## مراجع

احدیپور، پ.، و دینی، م.، (۱۴۰۱)، "مقایسه عملکرد شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل در حالت وجود یا عدم وجود نشت"، ششمین کنگره بین‌المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری ایران، دانشگاه هنر اسلامی، ۲۷-۲۵ مرداد، تبریز، ایران.

احدیپور، پ.، دینی، م.، و هاشمی، س.، (۱۴۰۱)، "بررسی کارایی شبکه‌های توزیع آب بر اساس عدم قطعیت‌های موجود با برنامه‌های بازسازی و نوسازی متفاوت" چهارمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، دانشگاه قم، ۱-۳ آذرماه، قم، ایران.



تائبی، ا. و چمنی، م.ر.، (۱۳۹۱)، "شبکه‌های توزیع آب شهری"، اصفهان: انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.

دینی، م. و تابش، م.، (۱۳۹۷)، "ارائه شاخص قابلیت اطمینان جدید برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۹ (۳)، ۱۶-۱. [dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.51035.2154](https://doi.org/10.22093/wwj.2017.51035.2154)

دینی، م.، محمدی، ا.، نورانی، و. و هاشمی، س.، (۱۴۰۰)، "پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با اعمال عدم قطعیت پارامترهای کلیدی"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*، ۱۲-۱۴، DOI:10.22034/jcee.2021.44669.2007

دینی، م.، عباس‌پور، غ.ر. و ثاقبیان، س.ع.، (۱۴۰۲)، "کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت متغیر فشار در گره‌ها"، *نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، DOI: 10.22112/JWWSE.2023.350090.1320

سیفاللهی آغمیونی، س.، بزرگ حداد، ا. و امید، م.ح.، (۱۳۹۰)، "بررسی تأثیر عدم قطعیت توأم نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها در کارایی شبکه‌های آبرسانی"، *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۲(۱)، ۳۵-۴۳، ۱۵.۱.۴۲.۱۳۹۰.۸۴۷۹.۱۰۰۱.۱۰۰۱.۲۰۰۸۴۷۹.۱۳۹۰.۴۲.۱۵.۱.۴۳-۳۵.

قاسمی، ع.، حسینی، م.، (۱۳۹۱)، "تحلیل عدم قطعیت در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با منطق‌فازی (مطالعه موردی: بخشی از شبکه فاضلاب شهر مشهد)"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۳(۲)، ۹۴-۱۰۷.

گوهری مقدم، س.، رحیم‌پور، م.، قادری، ک. و احمدی، م.م.، (۱۴۰۱)، "طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب تحت عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و استحکام بخشی"، *نشریه علمی پژوهش‌های نوین در مهندسی آب پایدار*، ۱(۲)، ۸۷-۱۰۱، DOI: 10.22103/nrsw.2023.20470.1018

گوهری مقدم، س.، قادری، ک.، رحیم‌پور، م. و احمدی، م.م.، (۱۴۰۲)، "آنالیز فازی شبکه‌های توزیع آب تحت شرایط کمبود فشار"، *مجله پژوهش آب ایران*، ۱۷(۲)، ۴۷-۵۸، <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.13998.2435>

Alperovits, E. and Shamir, U., (1977), "Design of optimal water distribution systems" *Water Resources Research*, 13(6), 885-900, <https://doi.org/10.1029/WR013i006p00885>.

Araujo, L.S., Ramos, H. and Coelho, S.T., (2006), "Pressure control for leakage minimisation in water distribution system management" *Journal of Water Resource Management*, 20 (1), 133-149, DOI:10.1007/s11269-006-4635-3.

Braun, M., Piller, O., Iollo, A. and Mortazavi, I., (2020), "A spectral approach to uncertainty quantification in water distribution networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(3), 1-14, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001138.

Dini, M., Tabesh, M., (2014), "A new method for simultaneous calibration of demand pattern and hazen-williams coefficients in water distribution systems", *Journal of Water Resource Management*, 28(7), 2021-2034, doi:10.1007/s11269-014-0592-4.

Dini, M., Asadi, A., (2019), "Pressure management of large-scale water distribution network using optimal location and valve setting", *Journal of Water Resource Management*, 33(1), 1-13, DOI:10.1007/s11269-019-02381-x.

Dini, M., Mohammadikaleibar, A., Hashemi, S. and Nourani, V., (2022), "Stochastic long-term reliability of water distribution networks using monte carlo simulation", *Journal of Urban Water*, 19(2), 151-160, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1971264>.

- Geranmehr, M.A., Asghari, K. and Chamani, M.R., (2019), "Uncertainty analysis of water distribution networks using type-2 fuzzy sets and parallel genetic algorithm", *Journal of Urban Water*, 16(3), 193-204, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1648527>.
- Hwang, H., Lansey, K., ASCE, A.M. and Jung, D., (2018), "Accuracy of first-order second-moment approximation for uncertainty analysis of water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(2), 1-18, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000864.
- Jafari, S.M., Zahiri, A.R., Bozorg Hadad, O. and Mohammad Rezapour Tabari, M., (2022), "Uncertainty analysis of optimal instruction for WDN pipes repair and replacement using fuzzy cut-hydraulic simulation approach", *Research Square*, Under review, 1-29, DOI:10.21203/rs.3.rs-1341370/v1.
- Moradi Sabzkouhi, A., Haghghi, A., (2016), "Uncertainty analysis of pipe-network hydraulics using a many-objective particle swarm optimization", *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(9), 1-12, DOI:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001148.
- Salas, J.D., Obeysekera, J., (2014) "Revisiting the concepts of return period and risk for non stationary hydrologic extreme events", *Journal of Hydrologic Engineering*, 19, 554-568, DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820.
- Seifollahi-Aghmiuni, S., Bozorg Haddad, O., Omid, M.H. and Mariño, M.A., (2013a), "Effects of pipe roughness uncertainty on water distribution network performance during its operational period", *Journal of Water Resource Management*, 27(5), 1581-1599, DOI: 10.1007/s11269-013-0259-6.
- Seifollahi-Aghmiuni, S., Bozorg Haddad, O. and Mariño M.A., (2013b), "Water distribution network risk analysis under simultaneous consumption and roughness uncertainties", *Journal of Water Resource Management*, 27(7), 2595-2610, doi:10.1007/s11269-013-0305-4.
- Sharp, W.W., Walski, T.M., (1998), "Predicting internal roughness in water mains", *American Water Works Association*, 80(11), 34-40, <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1988.tb03132.x>.